Régulation avec compensateur anti-windup d'une micro centrale hydroélectrique

M.Chenani et S.Doubabi*
Laboratoire d'Automatique et d'Informatique Industrielle, Faculté des Sciences et Techniques
Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc
**E-mail :doubabi@fstg-marrakech.ac.ma*

Résumé :

Cet article décrit la régulation avec anti-windup d'une micro centrale hydroélectrique (MCH). Un modèle de la MCH a été développé avec simulink [1] en s'inspirant du travail présenté à la référence [2]. Le modèle est utilisé pour évaluer les performances de deux types de compensateurs anti-windup [3] et [4]. Les résultats de simulation montrent que le régulateur PID conduit aux mêmes résultats que les deux compensateurs anti-windup dans le cas de faibles variations de la puissance du réseau , mais dans le cas d'une variation de la charge d'amplitude importante, la réponse du système est largement meilleure en présence de compensateurs anti-windup : la variation de la fréquence reste dans les limites et les oscillations de puissance produite sont largement réduites.

***Mots clés* :** Régulation, compensateur anti-windup, micro centrale hydroélectrique, simulation.

1-Introduction :

Le présent article à pour objectif ; l'étude en simulation sous ***simulink*** [1] d'un modèle d'une micro centrale hydroélectrique, formée d'une turbine Pelton et d'une génératrice synchrone, en vue d'une meilleure régulation de la fréquence de l'électricité produite et ceci malgré les brusques variation de la charge dont l'amplitude peut parfois être très grande. Le système de régulation agit sur le débit d'eau admis dans la turbine pour équilibrer la puissance fournie par la turbine et la puissance absorbée par le réseau électrique. Le débit est réglable à l'aide d'un pointeau mobile à l'intérieur de l'injecteur actionné par un servomoteur électrique. En pratique lors de brusques changements de la puissance absorbée par le réseau , la vitesse de déplacement du pointeau sature , ce qui engendre inévitablement un large dépassement , des oscillation et peut même ruiner la stabilité du système. Le comportement venant d'être décrit est appelé wind-up. Nous allons montrer, en simulation, qu'en présence d'un compensateur anti -windup , le dépassement et le temps de réponse de la sortie sont largement meilleurs. Nous comparons deux types de compensateur anti-windup, le premier est la technique de conditionnement proposé par Hanns [3] et le second a été proposé par ? str?m et Rundquist [4], Rundquist [5] et Rundquist [1].

2-modèle d'une micro centrale hydroélectrique en vue d'une simulation sous simulink

les composants essentiels d'une micro centrale hydroélectrique (MCH) sont représentés sur la figure 2.1 suivante :

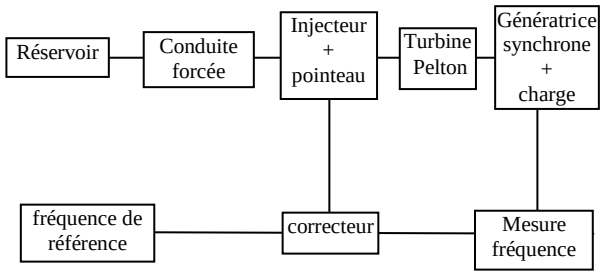


Figure 2.1 : diagramme des blocs du système MCH

2.1 modèle de la turbine Pelton

C'est une turbine à action , c'est à dire que l'énergie de l'eau à l'entée de la turbine est entièrement transformée en énergie cinétique et elle sort à la pression atmosphérique.

La puissance hydraulique fournie à la turbine est donnée par l'expression de la chute efficace suivante :

$$He=\frac{U}{g}(V1-U)(1+m\cos\beta) \qquad (2.1)$$

ou :

U : vitesse d'entraînement de la turbine

V : vitesse de l'eau au contact du jet avec l'auget

g : accélération de la pesanteur

m : rapport des vitesses relatives de l'eau au contact du jet avec l'auget et à la sortie à l'extrémité de l'auget.

β : angle entre les vecteurs de vitesse de l'eau d'entrée et de sortie au contact de l'auget

La puissance de la turbine est donnée par :

$$Pt=\rho g Qt He \qquad (2.2)$$

avec :

P_t : Puissance de la turbine[W]

Q_t : débit volumique de la turbine [m3/s]

ρ = 1000kg/m3 : masse volumique de l'eau

He :Hauteur efficace[m]

Le couple fournie par la turbine est :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} \quad (2.3)$$

la vitesse linéaire de la turbine s'écrit :

$$U = \Omega_t \frac{D_t}{2} \quad (2.4)$$

avec :

Ω_t : vitesse angulaire de la turbine en rd/s

D_t : diamètre de la turbine en mètre .

Finalement les relation (2.1), (2.2), (2.3), et (2.4) conduisent à l'expression suivante du couple :

$$C_t = \rho Q_t \frac{U}{\Omega_t}(V_1 - \frac{D_t}{2}\Omega_t)(1 + m\cos\beta) \quad (2.5)$$

Les unités SI sont utilisés dans cet article , pour les grandeurs physiques, alors que pour le modèle nous utilisons les grandeurs réduites « per unit system » :

q_t : débit de la turbine en (pu)

γ_t : vitesse du jet en (pu)

n_t : vitesse de la turbine en (pu)

c_t : couple de la turbine en (pu)

ainsi on a :

$$Q_t = q_t Q_t$$

$$V_1 = \gamma_t V_{1n}$$

$$\Omega_t = n_t \Omega_{tn}$$

$$C_t = c_t C_{tn}$$

Q_{tn} : débit nominal de la turbine en (m^3/s)
C_{tn} : couple nominal de la turbine en (N.m)
V_{1n} : vitesse nominale du jet en (m/s)
Ω_{tn} : vitesse nominale de la turbine en (rd/s)

la relation (2.5) devient :

$$c_t = \rho q_t Q_{tn} \frac{D_t}{2C_{tn}}(\gamma_t V_{1n} - \frac{D_t}{2}\Omega_{tn} n_t)(1 + m\cos\beta) \quad (2.6)$$

on pose :

$$k_t = \frac{D_t \Omega_{tn}}{2V_{1n}} \quad (2.7)$$

pour les valeurs nominales : q_t=1 ; γ_t=1 ; n_t=1 ; c_t=1.
La relation (2.6) conduit donc à l'expression du débit suivante :

$$Q_{tn} = \frac{2C_{tn}}{\rho D_t V_{1n}(1 - k_t)(1 + m\cos\beta)} \quad (2.8)$$

en remplaçant Q_{tn} par l'expression (2.8) dans la relation (2.6) on obtient donc :

$$c_t = \frac{q_t(\gamma_t - k_t n_t)}{1 - k_t} \quad (2.9)$$

la puissance de la turbine est donnée par la relation

$$p_m = c_t n_t \quad (2.10)$$

pour la vitesse du jet, et en considérant certaines approximations on a :

$$V_1 = \sqrt{2gH_t} \quad (2.11)$$

ou H_t représente la chute nette.

La chute nette en fonction de la chute nette nominale et la chute nette en (pu) s'écrit :

$$H_t = h_t H_{tn} \quad (2.12)$$

la relation (2.11) s'écrit en utilisant les grandeurs réduites sous la forme :

$$V_1 = \gamma_t V_{1n} = V_1 = \sqrt{2gH_t} \quad (2.13)$$

d'ou l'expression de la vitesse de la turbine en (pu) :

$$\gamma_t = \sqrt{h_t} \quad (2.14)$$

la turbine peut donc être représentée par le modèle suivant :

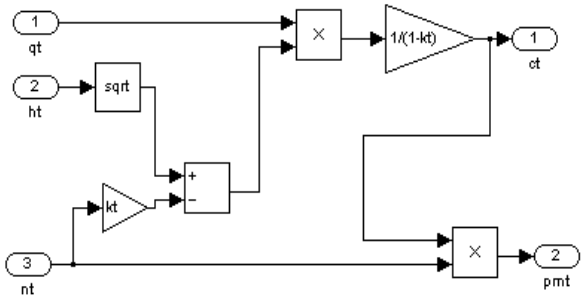


Figure 2.2 : modèle d'une turbine Pelton.

2-2 modèle de l'injecteur :

L'injecteur étant donné qu'il est formé par un pointeau qui se déplace dans une sorte de forme conique, sa modélisation revient à calculer la surface par laquelle passe le jet d'eau [2]. En prenant un injecteur de la forme suivante :

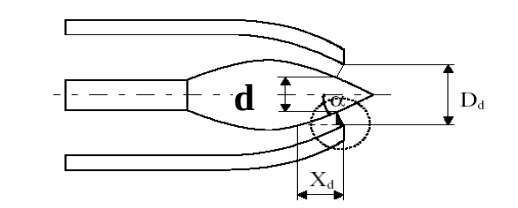


Figure 2.3 : schéma de principe d'un injecteur

La surface par laquelle passe l'eau s'exprime par:

$$S_d = \pi \frac{D_d - d}{2} X_d \sin\alpha \quad (2.15)$$

avec :
D_d : diamètre extérieur de l'injecteur

d : diamètre tangentiel du pointeau avec l'ouverture de la buse

α : angle d'ouverture du pointeau

X_d : ouverture en mètre du pointeau (avancement)

or :

$$d = Dd - 2X_d \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \qquad (2.16)$$

en remplaçant d dans (2.15) on trouve pour S_d :

$$Sd = \pi \sin\alpha (Dd\, X_d - X_d^2 \frac{\sin 2\alpha}{2}) \qquad (2.17)$$

Le débit dans la turbine est :

$$Q_t = S_d V_1 \qquad (2.18)$$

En grandeurs réduites, la surface S_d et l'avancement du pointeau X_d s'expriment :

$$S_d = s_d S_{dn} \qquad (2.19)$$

$$X_d = x_d X_{dn} \qquad (2.20)$$

En combinant les relations (2.19), (2.20)et (2.17) on trouve :

$$sd = \frac{\pi Dd\, X_{dn} \sin\alpha}{S_{dn}} (xd - kd\, xd^2) \qquad (2.21)$$

avec :

$$kd = \frac{\sin 2\alpha^2}{2Dd} X_{dn} \qquad (2.22)$$

pour des valeurs nominales: $S_d=1$; $x_d=1$ On a :

$$1 = \frac{\pi Dd\, X_{dn} \sin\alpha}{S_{dn}} (1 - kd) \qquad (2.23)$$

Donc :

$$S_{dn} = \pi \sin\alpha\, Dd\, X_{dn} (1 - kd) \qquad (2.24)$$

En remplaçant S_{dn} par sa valeur on aura :

$$sd = \frac{xd(1 - kd\, xd)}{1 - kd} \qquad (2.25)$$

et :

$$qt = sd\, \gamma t \qquad (2.26)$$

d'ou le modèle suivant pour l'injecteur:

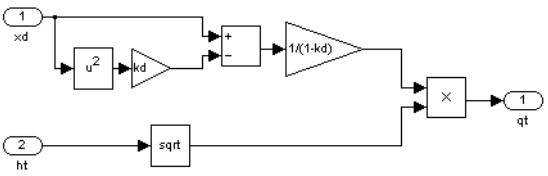


Figure 2.4 : modèle de l'injecteur

2-3 modèle de la micro centrale hydroélectrique en vue d'une simulation sous simulink.

Le modèle de la MCH est donné sur la figure 2.5. les blocs servomoteur, machine synchrone et charge triphasé sont ceux de la librairie (power system bockset) de simulink [1].

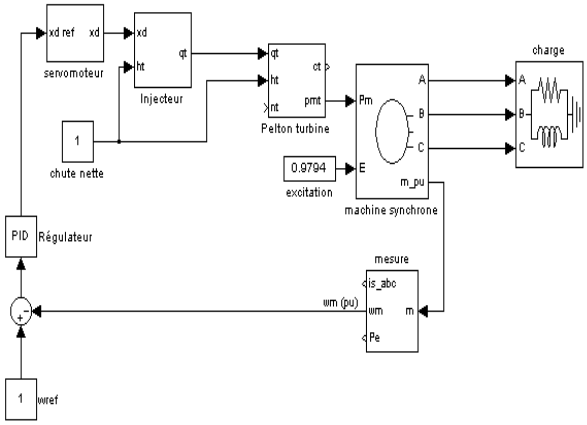


Figure 2.5 : modèle de la MCH avec système de régulation

3- conception d'un système de régulation et résultats de simulation :

Le système de régulation des groupes turbine alternateur a deux fonctions principales : la première est de ne pas laisser la fréquence s'écarter trop de la fréquence de référence et ce en adaptant le plus rapidement possible la puissance produite à la puissance demandée. La deuxième est la stabilité qui veut que le système de régulation écarté de sa position d'équilibre suite à une variation de la charge plus au moins importante y revienne le plus rapidement possible. On conçoit cependant que cette fonction n'est que très peu utilisée, et ce , même si elle tout aussi importante que la première . En effet, les brusques variations de charges sont l'une des sources de détérioration du matériel hydroélectrique les plus importantes. La deuxième fonction du système de régulation est donc d'accroître la durée de vie du groupe turbo alternateur .

L'idée la plus simple et la plus ancienne est d'utiliser un régulateur à effet proportionnel, intégral et dérivé plus communément appelé PID, de façon à ce qu'un accroissement de la fréquence du réseau électrique entraîne une diminution de l'ouverture de la buse qui se fait par le déplacement du pointeau et vice versa.

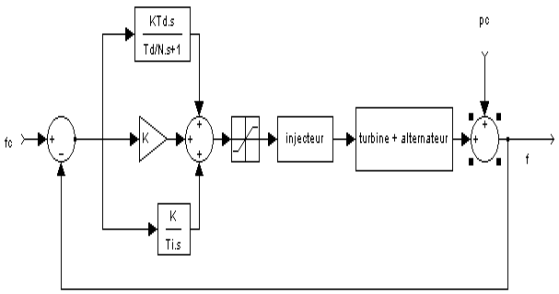


Figure 3.1: schéma blocs du système avec régulateur PID et limitation du déplacement du pointeau de l'injecteur.

fc : fréquence de référence
ε : écart de réglage
f : fréquence du réseau
K : coefficient de l'action proportionnelle
Ti : constante d'intégration
Td : constante du terme dérivée
Pc : perturbation due à la charge

3-1 Etude d'un exemple

Nous allons étudier, en simulation, la régulation par un simple PID de la fréquence du réseau électrique de la MCH de OUINSKRA(village du grand Atlas, à 70Km de Marrakech) dont les caractéristiques sont les suivantes [9] :

***Plaque signalétique*:**
Puissance: 15KW
Débit d'eau (nominal): 60l/s=0.06m^3/s
Hauteur utile: 32m
Canal d'amenée: L=180m
Conduite forcée: Pelton à un seul jet
Génératrice: synchrone triphasée, 1500tr/min

Turbine:

Pelton PT4 mono jet,
puissance au débit de l'équipement 16.3KW
vitesse de rotation nominale, 411tr/min
vitesse d'emballement, 740tr/min
débit, 60 litre/s

génératrice:
synchrone auto régulée, auto excitée,
400V/230V
Sn=20KVA
Fn=50HZ
Nn=1500tr/min
Nmax=2700tr/min

Injecteur:
Commandé par un moteur 24VDC
Dd=70mm
Xd=52mm

La figure 3.5 montre l'évolution de la fréquence du réseau autour de la consigne (50Hz), suite à des brusques changements de la puissance absorbée par le réseau , représentés sur la figure 3.7

Dans la pratique, la vitesse de déplacement du pointeau sature lors du changement brusques de la puissance du réseau, cette limitation engendre des oscillations et un large dépassement de la fréquence et de puissance produite comme le montre les figures 3.5a et 3.7a. En effet, en l'absence d'une prise en compte adéquate, l'influence de cette saturation peut se faire dramatiquement sentir sur le comportement du système , même longtemps après la disparition de la cause de la saturation. La stabilité du système peut être ruinée comme le montre les figures 3.5b et 3.7b.
Ainsi, avec un simple régulateur PID, une variation de charge de grande amplitude pourrait engendrer l'instabilité du groupe turbine alternateur.
Pour cela nous allons faire appel à un compensateur anti-windup

3-2 système de régulation avec anti windup

La figure 3.4 donne le schéma bloc d'un compensateur anti windup F(s). [3,4, 8].

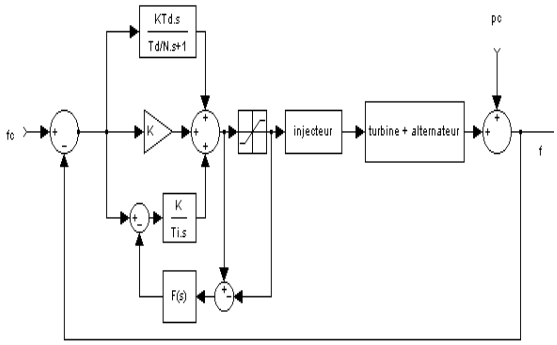


Figure 3.4: schéma block avec anti windup

Dans un premier temps nous utilisons la technique de conditionnement proposée par Hanus [3] et [8], pour laquelle $F(s)=\frac{1}{K}$ où K est le coefficient de l'action proportionnelle.

Les résultats de simulation de la régulation de la MCH en utilisant la technique de conditionnement sont donnés sur la figure 3.6 (courbe en pointillés). Ces résultats montrent que la régulation est largement meilleure qu'en absence du compensateur anti-windup.

Le temps de réponse de la micro centrale lors de changement de la charge est beaucoup plus meilleur et les oscillations de la réponse sont éliminés.

Sur la figure 3.6b le système reste stable avec un bon temps de réponse et de faibles dépassements (en pointillés) contrairement au cas du système de régulation sans anti windup(trais pleins).

Un autre type de compensateur anti windup à été proposé par ? strom et Rundquist [4, 5] pour lequel : $F(s)=\frac{Ti}{K\sqrt{TiTd}}$.

Les résultats de simulation dans le cas de ce compensateur sont représentés sur la figure 3.6 en trais coupés .

Les résultats sont donc meilleurs que le cas du correcteur PID sans anti windup. Mais ils sont très légèrement meilleurs comparés à la technique de conditionnement (en pointillés).

Les mêmes remarques reste valable pour les résultats de simulation concernant la variation de la puissance produite (figure 3.8)

4- conclusion

Le fait que l'énergie d'origine hydraulique soit toujours une industrie d'avenir, comme le montre la construction de nombreux barrages actuellement encore et les nombreux projets de micro centrales hydroélectriques ainsi que d'autre dans le domaine de l'électricité d'origine marémotrice, fait que les régulateurs de vitesse seront dans les prochaines années encore appelés à être développés et améliorés.

Les deux compensateurs anti-windup présentés dans cet article, en vu d'une meilleure régulation de la fréquence du réseau alimenté par la MCH et d'une meilleure réduction des oscillations de la puissance produite, ont donné de très bonnes résultats lors de brusque et important changement de la charge contrairement à la régulation par un simple PID.

Références :

[1] the math works, Inc (1997), simulink user's guide.

[2] N.Hugo (projet dynasim) EPF Lausanne Laboratoire d'électronique industrielle .

[3] Hanns , R.,« A new technique for preventing control windup", Journal A., Vol.21, no.1.pp 15-20,1980

[4] ? str?m, K.J, and L.Rundquist, "Integrator windup and How to avoid it", proceeding of the America control conference, Pittsbourgh, pp 1693-1698,1989.

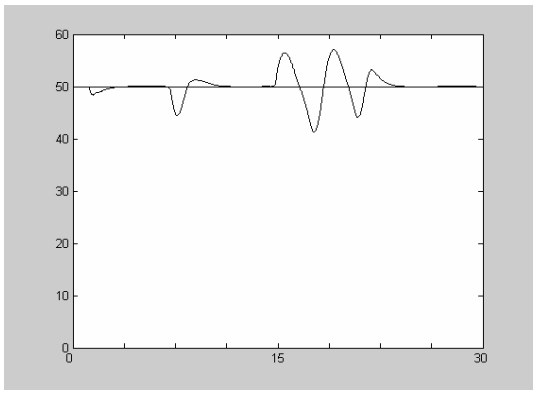
[5] Rundquist, L., "anti-reset windup for PID controllers", pre-prints of the 11th IFAC wold congress, Vol 8, pp 146-151, 1990.

[6] Rundquist, L. "Anti-reset windup for PID controllers", Doctoral Dissertation, 1991.

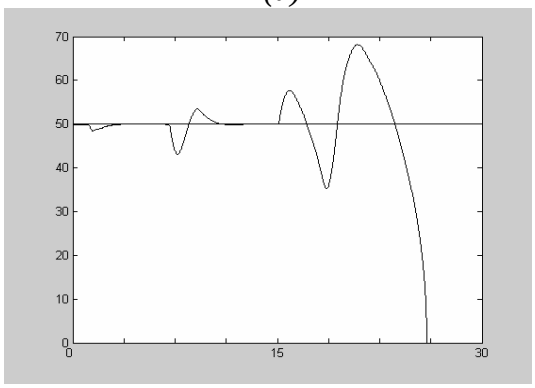
[7] Vrancic, D.and Y.Reng "Anti-windup and conditionnel Transfer for PID controller", proceeding of the third Electrotechnical and Computer science conference ECK.94, Portoroz, Vol .A, pp 183-186, 1994

[8] Vrancic,D, Y.Reng, J.Petrovêiv, and R.Hanns, " a new tuning method for PID controllers, 4th IFAC conference on system structure and control", Bucharest, october 23-25, 1997

[9] Manuel d'entretien de l'équipement électromécanique de la micro centrale hydraulique de Ouinskra , CDER 1997

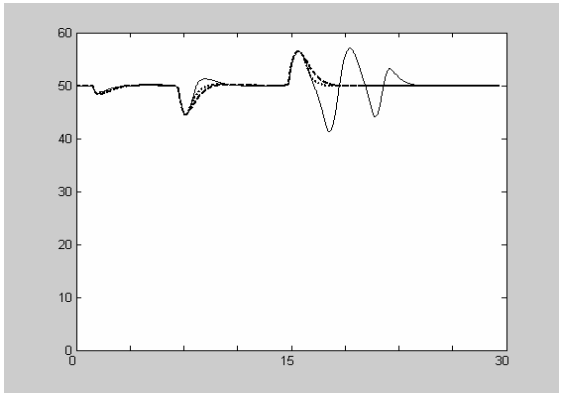


(a)

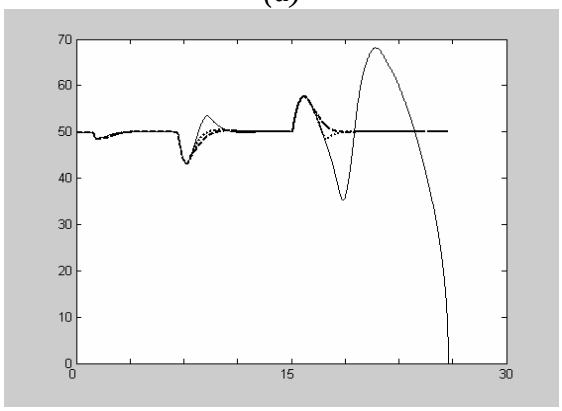


(b)

Figure 3.5 : Evolution de la fréquence suite à des brusques changements de la charge avec simple PID

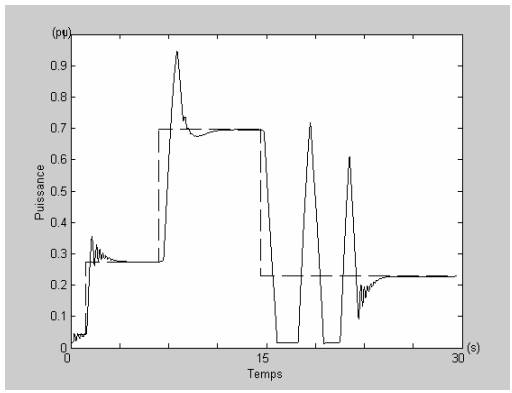


(a)

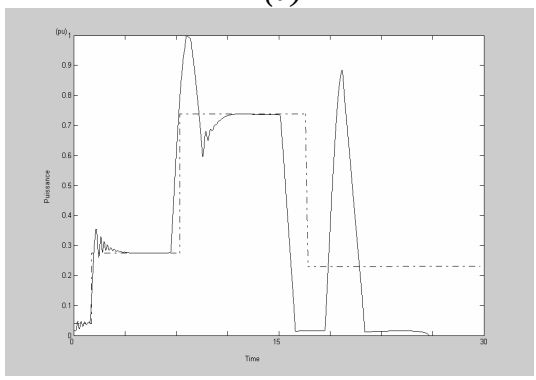


(b)

Figure 3.5 : Evolution de la fréquence suite à des brusques changements de la charge avec anti-windup

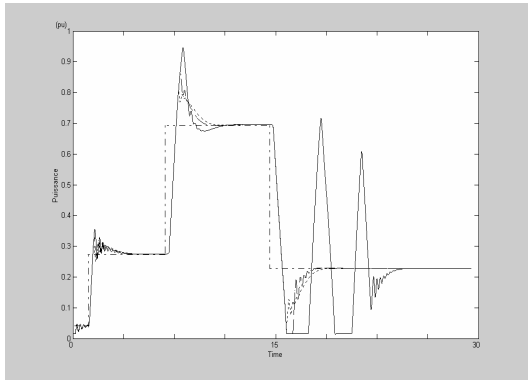


(a)

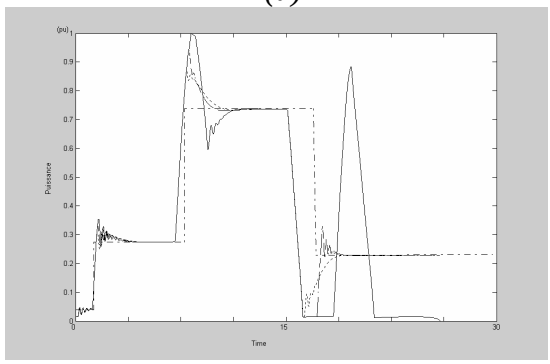


(b)

Figure 3.7 : Variation de la puissance produite suite à des brusques changements de la charge avec simple PID



(a)



(b)

Figure 3.6 : Variation de la puissance produite suite à des brusques changements de la charge avec anti-windup